第４章　都市路線バスに適するシリーズハイブリッドシステムの検討

4.1　緒　言

運輸部門におけるエネルギ消費を抑制し環境負荷を低減するためには、旅客輸送を自家用乗用車から路線バス等の公共交通機関へ誘導することが重要な手段の一つであるとされている[(1)]。路線バスは乗車率が適正な場合、乗用車に比べて旅客１人当たりの排出ガス、エネルギ消費や道路有効利用の点で格段に優れ、また鉄道と異なり大規模なインフラ整備が不要でキメ細かな輸送が可能であるため、旅客輸送需要の多い都市部では本来ならば中核的となるべき交通機関である。しかしながら路線バスの輸送量は長年にわたって減少傾向を示しており、その原因としては自家用乗用車の普及や、渋滞によるバス運行の遅延等、多くの外的な要因が挙げられている。しかし、既存のディーゼル機関駆動方式のバス車両は加速性能や居住性、乗り心地の点で魅力ある乗り物であるとは言い難い点が多いことも否めない。

したがって、バスが中核的な都市交通機関として見直されるための一方策として、動力システムに、従来の概念にとらわれない新技術の導入が必要であると考えられる。そこで本章では、走行速度が比較的低く立席乗車がある路線バスに対しても、第２章で述べたコミュータカーと同様に、シリーズハイブリッドシステムの応用を検討することとした。まず都市域における営業路線上でのバス車両を用いた実車走行により特有の走行パターンを調査し、それに基づいてバス車両向けのシリーズハイブリッド動力システムを設定した。これを模擬した台上運転装置や充放電試験装置等による実験を行い、走行に要求される電力や制動時の回生電力を把握した。そして電池やスーパーキャパシタ等の蓄電装置の仕様を検討するとともに、それらで生じる充放電損失の把握方法について考察したうえで、動力システムとしてのエネルギ効率の評価を試み、従来型のディーゼル機関駆動方式のバスと比較して２倍近い値を達成できることを示した。

4.2　路線バス走行パターンの調査

4.2.1　調査方法

第２章においてはコミュータカーの実験に先立ち、実車による都市部の乗用車の走行実態調査を行ったが、本章においてもまず都市路線バス特有の走行条件を把握するために、バス車両を用いた実車走行による調査を行った。図 4.1 は、例として取り上げた二つのバス路線である路線Ａと路線Ｂの配置を示し、表 4.1 はそれらの路線の概要を示す。路線Ａは東京近郊の鉄道駅と住宅団地を結ぶ約 3.1㎞ の短距離路線である。一方、路線Ｂは近郊の市街地を

挟んで並行する鉄道の２つの駅を結ぶ約 8.2㎞ の中距離路線であり、沿線は商業地域や住宅地域、大規模公園など多様な形態である。調査に当たっては、バス会社から路線バス車両を借り切って、会社専属の運転士に運転を依頼することにより実際の旅客営業運行に準じた路上走行を各路線につき数回ずつ行い、客席に乗車した測定者が車速を連続測定した。通常の路線バスの運行においては、乗降客がいない場合は停留所を通過するが、本調査では通勤時間帯の運行状況を反映して路線上の全ての停留所に停車することとし、停留所１箇所当たりの停車時間はそれぞれ５秒間程度とした。

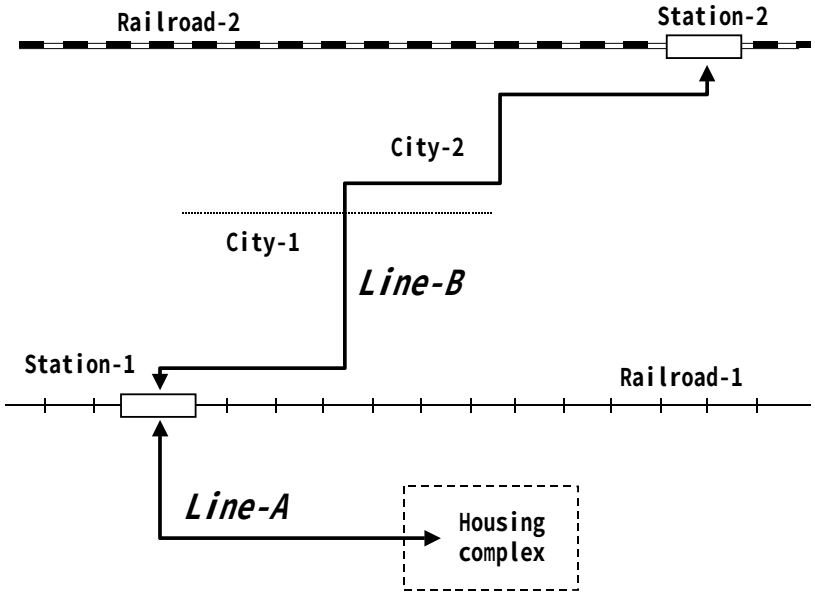


図 4.1　走行実態調査を行ったバス路線の配置

表 4.1　走行実態調査を行ったバス路線の概要

Line	Distance	Bus Stop Interval (Average)	Speed Limit
A	3.12 km	0.34 km	30 km/h
B	8.23 km	0.33 km	40 km/h

図 4.2 は実車路上走行によるデータ収集システムの概要を示す。供試車両は機械式５段変速機（通常は２速発進）を備えた全長 10.5m、定員 77 名、機関出力 169㎾の都市路線用大型ディーゼルバスである。本調査においては供試車両への加工が一切不可能であるため、車速の測定は、検出器が車両に短時間で脱着できる光学式の非接触車速計を使用した。検出器は吸盤付の専用支持金具で車体後部のバンパおよび外板に固定され、特殊なカメラで走行中に路面を連続的に観察するものである[(2)]。

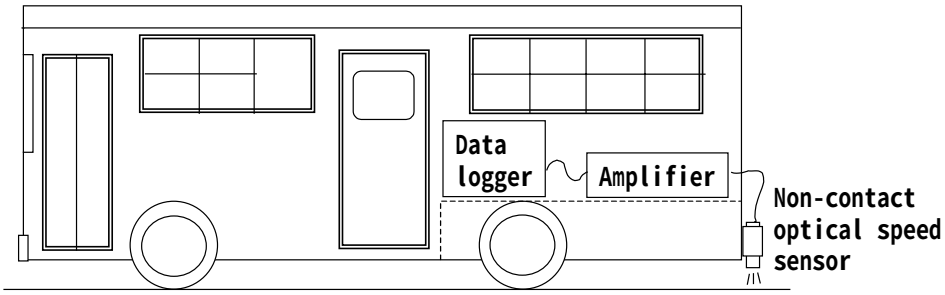


図 4.2　実車路上走行における車速データ収集システム

図 4.3　非接触式車速計検出器のバス車体後部への取り付け状況

図 4.3 は、検出器の供試車両への取付け状況を示す。万一、走行中に検出器が脱落すると、それ自体が破損するだけでなく、後続の車両に当たって交通事故を引き起こすおそれがあるため、ロープや粘着テープによる落下防止の処置をとった。この検出器によって得られた電気信号を車内後部座席に設置した専用増幅器に送信し、画像処理により路面パターンの変化を認識して車速を演算した[(2)]。そのため第 2 章で述べたような、車両の推進軸の回転速度を検知して車速に換算する方法と比較すると、車輪外径の変化による誤差が生じないという利点を有するが、雨天時の濡れた路面の観察や検出器の保護等に難点がある。専用増幅器からは、時々刻々の車速データをアナログ出力させ、汎用小型データロガの電子媒体（コンパクトフラッシュメモリ）に 500msecの間隔で記録した。これらの計測器に必要な電源として、供試車両の車内に小型乗用車用鉛酸電池を持ち込んで使用した。車速データは測定終了後にパーソナルコンピュータの表計算ソフトウェアを用いて解析処理を行った[(3)]。

4.2.2　調査結果と考察

(1) 片道１回走行ごとの解析　　各路線の片道１回毎の走行における発進・停止の頻度を、大型自動車の代表的走行パターンとされるM15 モード[(4)]と比較して図 4.4 に示す。バスの走行距離１㎞当たりの発進・停止回数（すなわちショートトリップの数）は路線Ａ、路線Ｂとも概ね５～5.5 回であるが、これは第２章の図 2.8 に示した乗用車の都市内走行の３倍程度、またM15 モードの 1.5 倍程度の発進・停止頻度である。その原因としては、バスは他の自動車に比べ、数百メートル毎に設けられた停留所での停車・発進が加わること、また立席客への配慮から加速度の大きさや変動が制約を受けるため交通信号の変わり目で停止させられる確率が高いこと等が考えられる。そのため、路線バスにおいては特に車両の発進加速に関する特性が、運行上の平均車速や乗客の乗り心地を大きく左右するものと予測される。

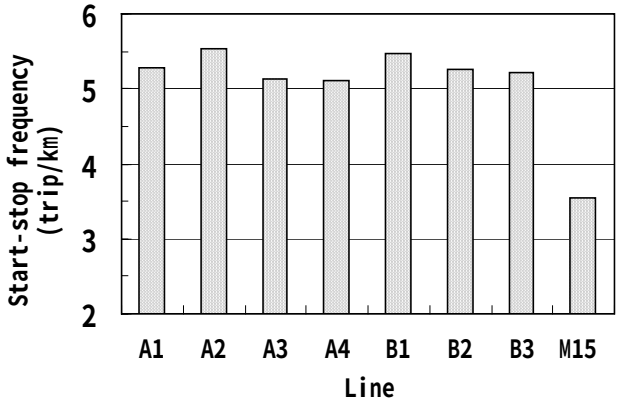


図 4.4　繰り返し調査における路線バスの走行 1㎞ 当たりの発進・停止頻度
（Ａ：路線Ａ　　Ｂ：路線Ｂ）

各路線の片道１回毎の走行における平均車速と、全運転時間に対する停車時間率を、M15 モードと比較して図 4.5 に示す。全運転時間の平均車速は、路線Ａでは 17㎞/h 前後でM15 モードよりやや高く、路線Ｂでは 15㎞/h 前後でM15 モードとほぼ同等である。また走行中の平均車速はどちらの路線も 20㎞/h 前後で、M15 モードのそれを 10%程度下回っている。停車時間率は両路線ともM15 モードより低いが、これは路線が近郊に設定されているので、M15 モードで代表される都心部に比べて渋滞が少ないためと考えられる。さらに路線Ａの場合は路線Ｂと比べて、発進・停止の頻度はほぼ同じであるが停車時間率がやや低く、全時間にわたる平均車速が若干高い傾向を示す。これは路線Ａが設定されている道路は、制限速度は低いが、地域間を結ぶ主要道路ではないため交通量が比較的少なく、１回当たりの停車時間が比較的短いためと考えられる。

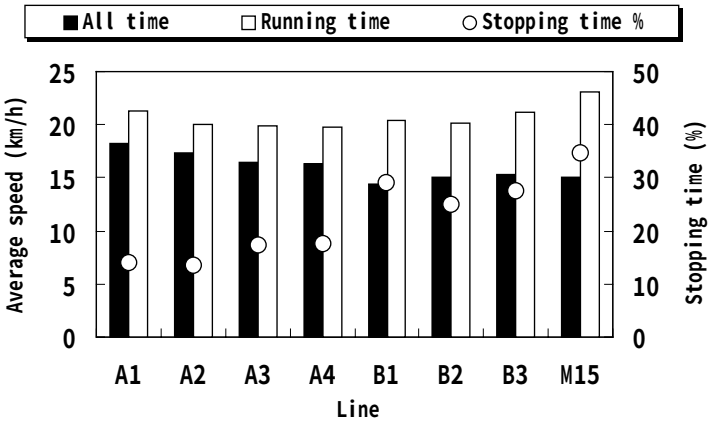


図 4.5　繰り返し調査における路線バスの平均車速と停車時間率
（A：路線A　　B：路線B）

(2) ショートトリップ単位で観察した加減速状況　　上記のバス路線走行における車速パターンの代表例を、M15 モードと共に図 4.6 に示す。これらは第２章で述べたコミュータカーの都市内走行パターンと同様に、多数のショートトリップで構成される。両路線の最高車速は道路の交通法規上の速度制限により、路線Aでは 30㎞/h、路線Bでは 40㎞/h 程度に留まっている。路線Aでは比較的単純な発進・停止の繰り返しであるが、路線Bでは多様な沿線形態を反映してトリップの車速や距離のばらつきが大きく、途中には渋滞が発生する区間も含んでいる。

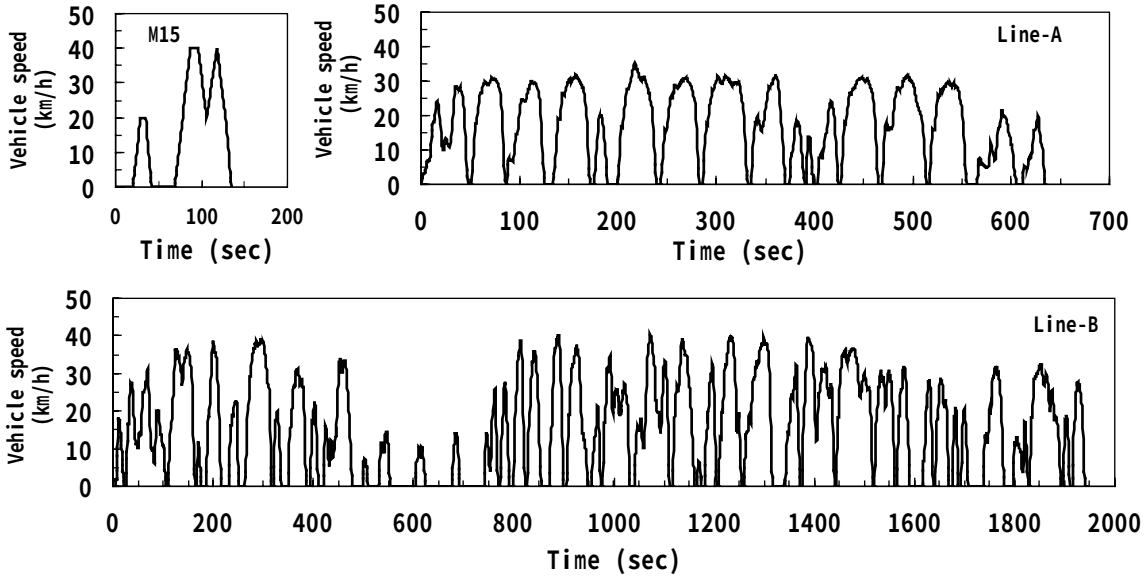


図 4.6　M15 モード、および路線A、路線Bにおける代表的なバス車速パターン

走行１分間当たりの平均トリップ数をみると、おおむね路線Ａで 1.6、路線Ｂで 1.3 であり、M15 モードよりも５～８割程度多い。これは前述のように、路線バスはトラック等の他の大型自動車と比べても、停留所や交通信号等により発進・停車の頻度がより高くなるためと考えられる。

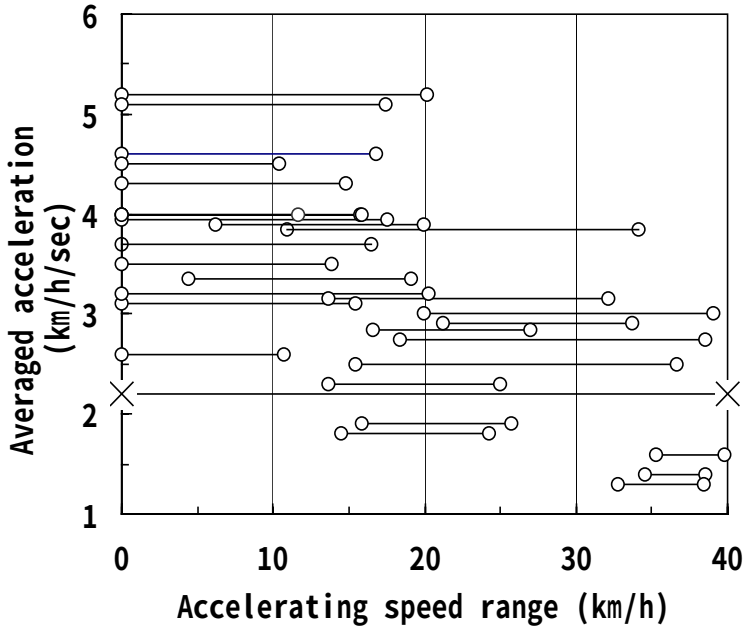


図 4.7　発進加速時の平均加速度分布　（○：路線Ｂ、　×：M15 モード）

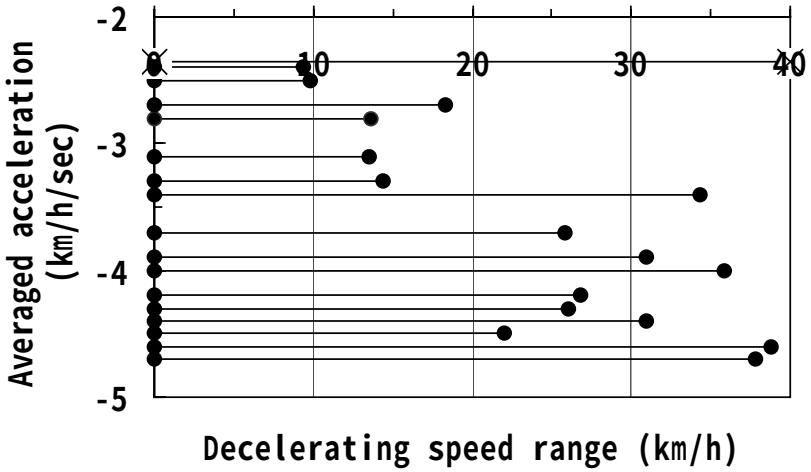


図 4.8　減速停止時の平均減速度分布（●：路線Ｂ、×：M15 モード）

路線Ｂの各トリップの発進加速時における車速変化領域別の平均加速度を図 4.7 に示す。供試車両は前述のようにクラッチ付の機械式変速機を搭載しているため、発進加速は変速操作をはさんで断続的に行われる。そこで図中の各プロットは、変速操作を挟んだ一回毎の連

続的な加速における車速変化域と、その間の平均加速度を示す線分として表した。停止状態から２速ギアで発進した直後の加速度は最大の場合で 5㎞/h/s（約 0.14G)を超え、M15 モード中の加速度の約 2.5 倍に相当するが、第２章の図 2.6 で示した乗用車の加速状況に比べると低い値である。これは、路線バスの運行中の加速度は車両自体の加速能力だけでなく、立席乗客の安全確保の点からも制約を受けるためと考えられる。なお３速から４速にシフトアップされ、最高運転速度である 40㎞/h 付近まで達した時点では、平均加速度は 2㎞/h/s 程度と、発進直後に比べて大幅に低下する。

同様に、減速停止時の減速度の分布を図 4.8 に示す。減速停止の場合は発進加速の場合と異なり、途中の変速操作が無いため、減速開始時点から停止まで連続的に減速する。その減速中の平均減速度は４～５㎞/h/s 程度で、M15 モード中の減速度の２倍程度に達するが、やはり乗客の安全確保のため、図 2.6 で示した乗用車の減速状況よりもかなり低い値である。

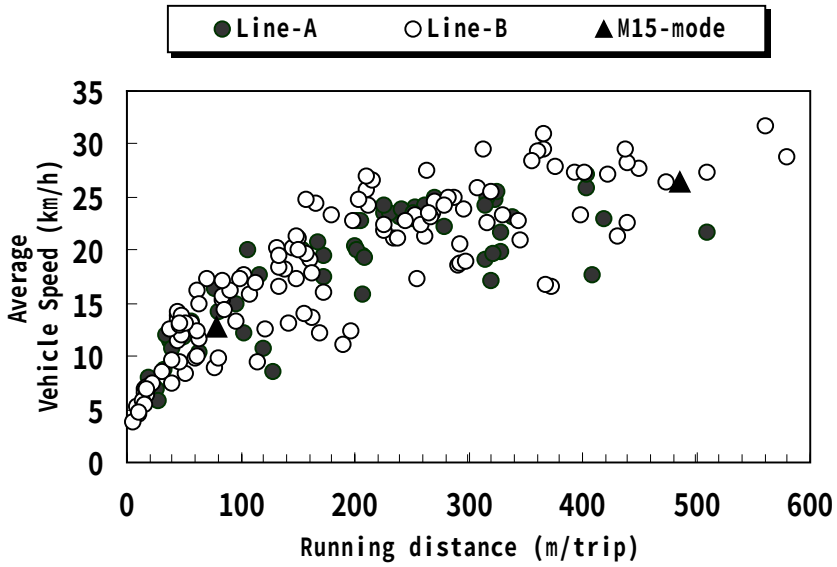


図 4.9　個々のショートトリップの走行距離と平均車速

図 4.9 は、個々のトリップの走行距離と平均車速を示す。路線Ａのトリップの走行距離は概ね 400m以下の範囲に多く分布している。これに対し、路線Ｂのトリップの走行距離は 10～600mの広範囲に分布しており、その過半数が 300m以下である。これは路線Ａに比べ距離が長く道路状況が多様なため、走行区間の違いによる交通量や信号機配置、停留所間隔等のバラツキが大きく、渋滞区間では数多くの短小なトリップが発生するためと推定される。また平均車速はおおむね走行距離が長いほど高くなる傾向を示すが、道路の制限速度が 40㎞/h であるため、200m以上のトリップでは距離が延びても平均車速は頭打ちとなっている。

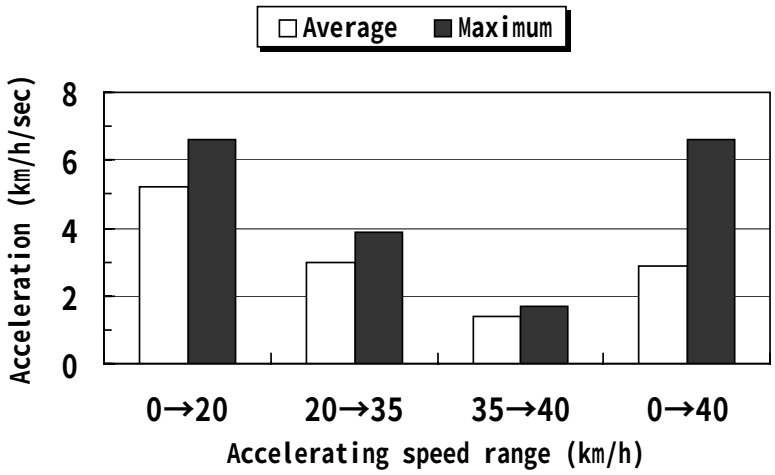


図 4.10　発進加速における変速段毎の平均加速度と最大加速度の例

１トリップにおける発進加速時の変速段別の最大加速度と平均加速度の一例を図 4.10 に示す。変速段としては、発進から 20km/hまでは２速、35km/hまでは３速、それ以上は４速を使用して加速している。発進から２速で加速中の瞬間的な最大加速度は約 6.5km/h/secで、立席乗客が安全に姿勢を保てる加速度の限界に近い値と考えられるが[5]、平均加速度は約 5km/h/secである。また発進から 40km /hに達するまでには、途中２回の変速操作で加速が中断されるため、その中断時間を含めた 0→40km/hの平均加速度は 3km/h/sに留まっている。これは、摩擦係数が極めて小さい鉄輪駆動ゆえに加速度が大幅に制約される通勤用電車と実質的には同じ水準であり、本来は加速度が高くとれるゴムタイヤ駆動の利点があまり活かされていないといえる。ディーゼル機関と機械式変速機を組合せた従来のバス車両では、このような加速の中断を余儀なくされるため、実質的な加速能力や乗り心地（特に立席乗客）の低下を招いているものと考えられる。

表 4.2　想定した中型路線バスの車両諸元

Item	Specification
Size (L,W,H)	9,000mm×2,300mm×3,000mm
Passenger & Driver	60 person
Vehicle mass	7800 kg
Traction Wheel Diameter	0.41 m
Coefficient of Rolling Resistance	0.015 (N/N)
Front Projection Area	6.73 m2
Coefficient of Aero Resistance	0.04 (N/m2/(km/h)2)

4.3　シリーズハイブリッド動力システムの検討と性能予測

4.3.1　バス車両と動力システムの想定

上記の調査結果から、都市路線バスは発進停止が特に頻繁であり、かつ乗客の安全確保の面から最大加速度を大きく採れないため、その動力方式としては、前述のように電動機駆動による連続的な加速と電力回生制動が可能なシリーズハイブリッドシステムが最適であると考えられる。その採用を検討する対象車両として、表 4.2 に示す中型路線バスを想定した。

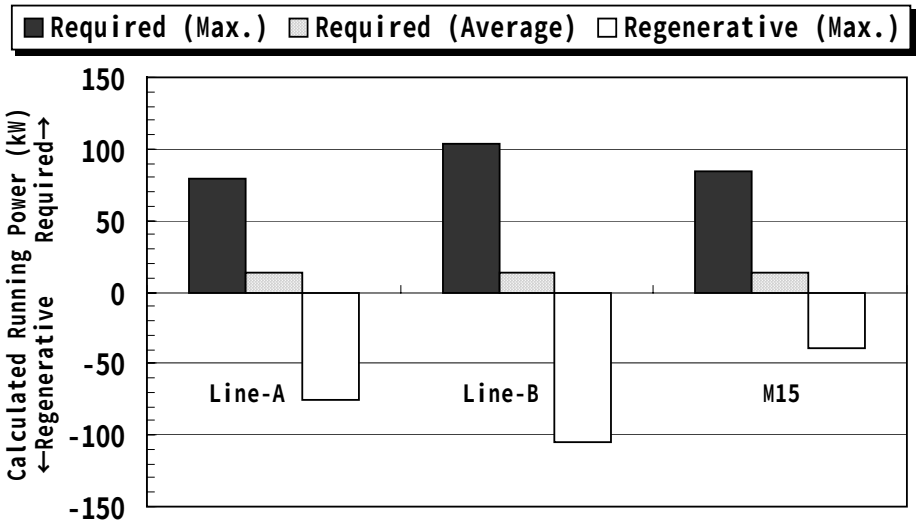


図 4.11　加減速走行における想定車両の走行仕事率と回生仕事率（計算値）

表 4.2 の想定車両で各車速パターンを運転した場合の要求走行仕事率の最大値と全時間平均値、および回生仕事率の最大値（計算値）を図 4.11 に示す。走行抵抗や走行仕事率は前章の式（2-1）～式（2-7）にしたがって算出した。図によれば、M15 モード運転の場合、要求走行仕事率の最大値は 84kW となるが、平均値はその約 15%に過ぎない。また最大回生仕事率は最大要求走行仕事率の 50%弱である。これに対し、路線A運転の場合、要求仕事率の最大値と平均値はM15 モード運転とほぼ同等であるが、最大回生仕事率はM15 モードの場合の約２倍となる。また路線Ｂ運転の場合、M15 モードよりも急な加速を多く伴うため最大要求仕事率は 100kW を超えるが、平均要求仕事率は路線Ａと同様にM15 モードとほぼ同等である。一方、制動時の最大回生仕事率は 100kW 以上となり、M15 モード運転の場合の３倍近くに達する。この結果から、都市路線バスの走行においては要求仕事率の最大値と平均値の差が大きいため、内燃機関を原動機として用いるに当たっては負荷の平準化が望ましいといえる。また減速時の回生仕事率はM15 モードを大幅に上回るため、動力システムとしてのエネルギ効率を高めるためには、それを無駄なく回収することが重要な課題であると考えられる。

上記のパターン運転における 1㎞ 当たりの要求走行仕事量と回生可能な仕事量（エネルギ）の計算予測結果を図 4.12 に示す。路線バスは発進・停止が特に頻繁で最高車速が比較的低く、車両質量が大きいため、慣性加速エネルギの全要求走行エネルギに対する比率は 65%前後、計算上回生可能なエネルギは要求走行エネルギの 50%前後となる。これは第２章で述べた小型軽量のコミュータカーよりもかなり高い比率である。路線Ａ走行の場合の要求走行仕事量と回生可能な仕事量はM15 モード走行よりやや少なく、路線Ｂ走行の場合はM15 モード走行より若干多くなっている。図 4.4 で示した発進・停止頻度の高さが必ずしも単位距離当たりの要求走行仕事量の増加につながっていないが、この原因としては、路線走行ではM15 モード走行に比べて、車速の低いトリップ数の構成比率が高いこと、中速域からの途中加速が少ないこと等が考えられる。したがって、実際の路線運行に即した路線バス用動力システムのエネルギ効率の向上を図るためには、駆動のための要求走行仕事量を低減するとともに、回生可能な仕事率がM15 モード走行よりも大幅に上回る制動時のエネルギ回収を改善することが特に重要であると考えられる。

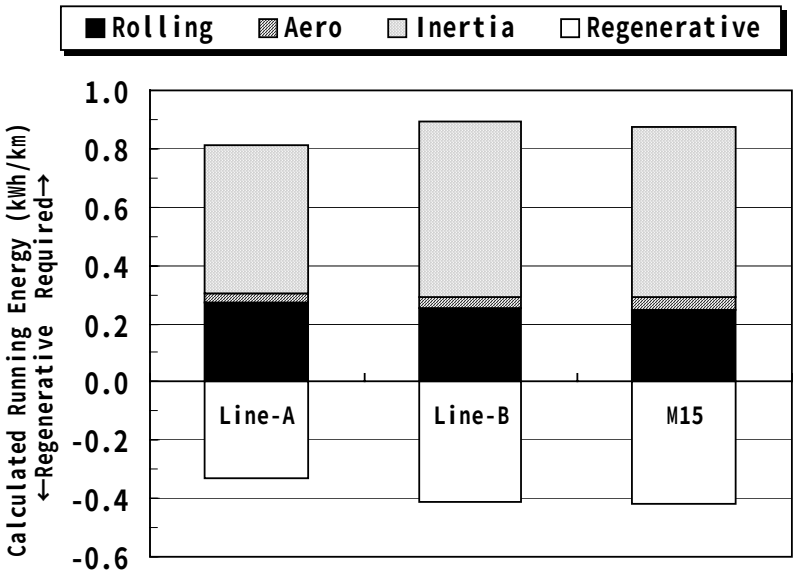


図 4.12　加減速走行における想定車両の走行仕事量と回生可能なエネルギ（計算値）

以上の検討結果に基づき、路線バス用の動力システムとしても、電動機で車両を駆動する方式を採用することが最適であると判断した。しかしコミュータカーに比べ、車両質量が格段に大きく、１日当たりの走行距離が長いため、純電気動力方式の採用は非常に困難であると考えられる。そこで、小型ディーゼル機関で駆動される車載発電機を主電源とし、各車輪に内蔵された電動機４基による四輪駆動の都市バス用シリーズハイブリッドシステムを想定

した[(6)(7)]。その諸元と構成を表 4.3 および図 4.13 に示す。電動機システム１基当たりの仕様は、第２章で述べたコミュータカー（車両２）のものと同一である。発電機出力は、M 15 モードを繰り返し運転できることを必要条件とし、表 4.2 に示した想定車両の全時間平均要求走行仕事率に、電気的な損失や補機類の電力消費が加わることを考慮して、その約 1.5 倍に相当する 20kW程度を目安とした。なお、本システムの給電は車載発電機のみによるものとし、外部電源を利用する充電は一切行わないこととした。また要求電力の変動や回生電力の回収に対応するための蓄電装置としては、二次電池の他に、第３章および上記の検討結果に基づいてキャパシタの併用を検討することとした。これら蓄電装置の諸元については後述する。さらに、バス車両は乗用車に比べて補機類や客室設備等の所要エネルギが格段に大きいことを考慮し、駆動モータシステム以外に常時 2kWの電力を消費するものと仮定した。

表 4.3　想定したバス用シリーズハイブリッド動力システムの諸元

Item		Specification
Traction Motor System	Type	In-wheel AC Induction
	Maximum Speed	6000 rpm
	Rated Speed	3000rpm
	Max. Output Power	40 kW （×4 = 160kW)
	Max. Output Torque	125 Nm （×4 = 500Nm)
	Max. Regen. Power	25 kW (× 4 =100kW)
	Max. Regen. Torque	81 Nm （×4 = 324Nm)
	Controller	PWM Inverter
	Acceptable volt.	DC 190V - 290V
On-board Generator	Output power	21kW
	Operation	Constant Power or Stopping
Total Reduction Gear Ratio (Motor to Wheel)		15
Auxiliary consumption (kW)		2.0
Maximum vehicle speed		65 km/h

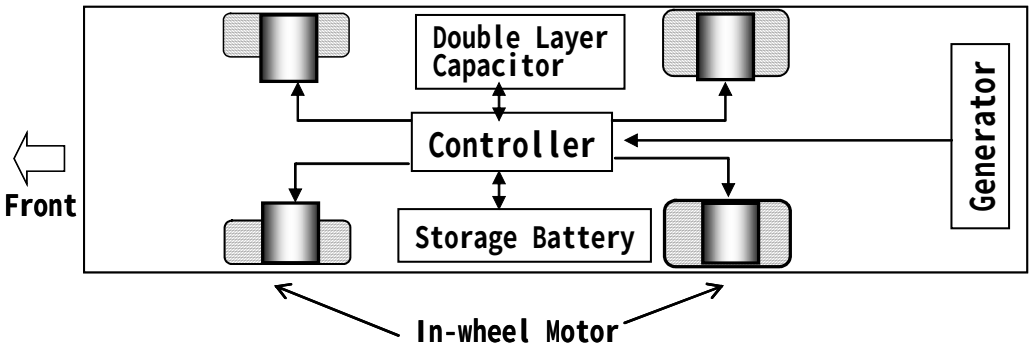


図 4.13　想定したバス用シリーズハイブリッド動力システムの構成

4.3.2　想定車両の性能予測

表 4.3 のシリーズハイブリッドシステムを搭載した表 4.2 の想定車両の加速能力と回生制動能力（計算値）を図 4.14 に示す。加速においては発進から 30㎞/h に達するまで 6㎞/h/s での連続加速が可能であり、また 40㎞/h においても 4㎞/h/s の加速能力を有しており、図 4.7 に示したような路線走行に求められる加速条件を十分に満たすことが可能と判断できる。一方、回生制動能力に関しては、図 4.8 に示した路線走行の減速条件に対しては制動トルクが多少不足するが、制動エネルギの大半を電気的に回収できるものと推定できる。

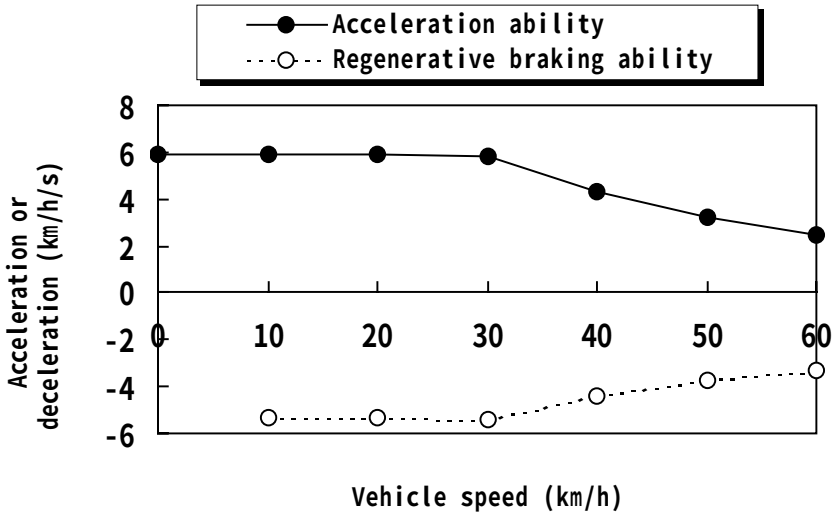


図 4.14　想定車両の加速能力と回生制動能力（計算値）

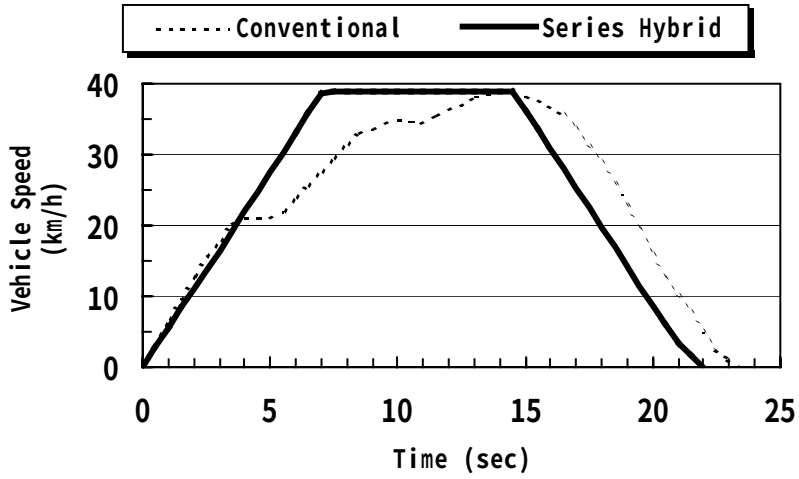


図 4.15　発進加速の連続化によるショートトリップ走行時間の短縮例

実車走行で得たトリップの一例をとって、前節の実車路上走行のように変速操作を伴い断続的な発進加速を行って走行する場合と、上記で想定した電気動力システムの採用により連続的に加速して走行する場合の車速変化を比較して図 4.15 に示す。後者は前者より７秒早く最高速度に達し、８秒間の定速走行後に減速する。そのため、最大加速度を高めることなくトリップの所要時間が約１秒短縮される。また加速度の変化も極めて少ないため乗り心地が大幅に改善されるものと予測されるが、これは特に立席の乗客に対して大きな利点となり、近年重視されているバリアフリーの観点からも非常に有意義であると考えられる。

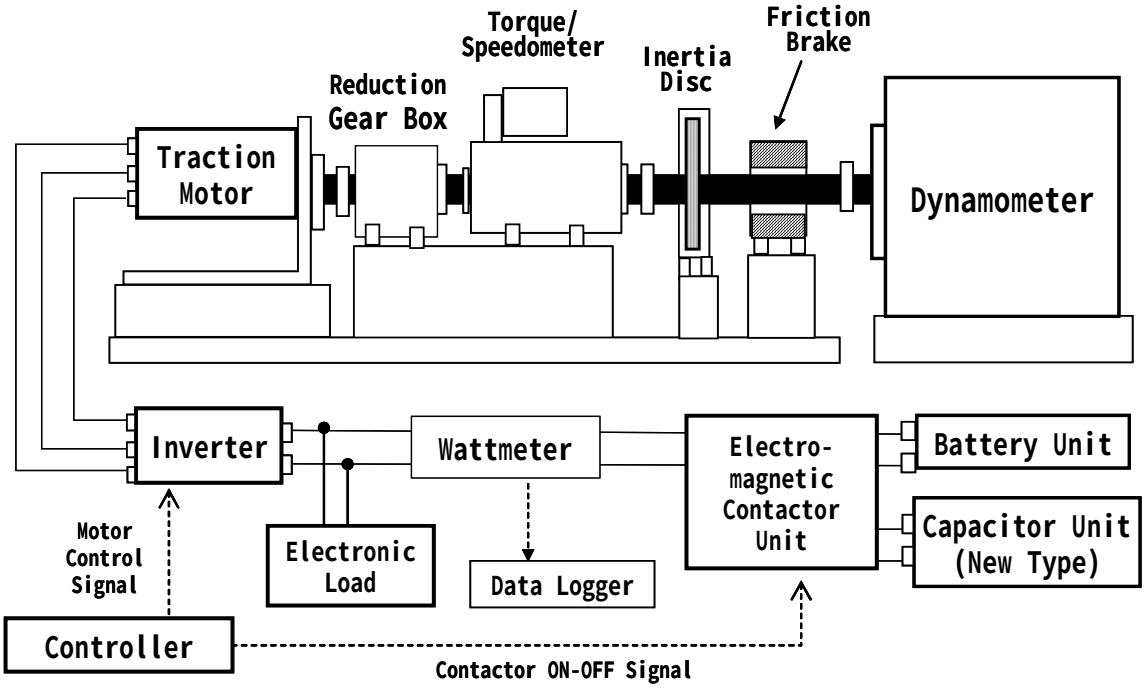


図 4.16　実機単体台上運転装置の構成（想定車両の 1/4 相当を再現）

4.4　電動機システムの台上単体運転による要求電力と回生電力の測定

4.4.1　実験装置および実験方法

表 4.3 および図 4.13 で想定した車両が、路線バスの車速パターンにしたがって実際に路上を走行する際の要求電力や回生電力を把握するために、図 4.16 に示すように、想定車両の駆動電動機システム（三相交流誘導電動機および制御インバータ）４基のうちの１基分を単体台上運転装置上に設置した。本実験における主な負荷装置としては、電気慣性機能を有し、かつ車両の空気抵抗および転がり抵抗による走行抵抗の設定が可能な交流式エンジンダイナモメータを使用した。実際の車両においては４輪駆動方式を採用しても、各駆動輪ごとの駆動力や制動力は接地荷重や操縦性安定性の理由から差異が生じるが、本実験では近似的にそ

れら駆動力・制動力は常に均等に配分されると仮定した。そこで想定車両の計算上の慣性加速抵抗、転がり抵抗、空気抵抗の和である走行抵抗の 1/4 に相当する負荷トルクをダイナモメータ等により発生させた。この場合、負荷装置側に必要な慣性質量を全てダイナモメータの電気慣性機能によって設定しようとするとダイナモメータ自体のトルク制御が不安定になるため、慣性質量の約 30%を供試電動機とダイナモメータの間に配置した小型回転慣性円板により付加することとした。回転軸上にはその他に、前章の台上運転装置と同様に、回生制動力の不足を補う摩擦式ブレーキと、動力伝達系の機械損失を再現する減速機を配置した。また、補機類等の電力消費を再現するため、容量 1kW の小型電子負荷装置を電動機システムのインバータ直流側と並列に配線した。

表 4.4　単体台上運転の電源として使用した電池とキャパシタの諸元

Device	Type	Nominal Capacity (1 module)	Nominal Voltage (1 module)	Number of Module (for 1 unit)	Storage Energy (kWh)
Battery	Sealed Lead-acid	25Ah	12V	20	6.00
Super Capacitor	Organic Solution	62F	54V	6	0.15

この台上運転の電源としては、前述の車両想定に基づいて鉛酸電池とキャパシタを併用することとした。その諸元を表 4.4 に示す。本実験で使用したキャパシタは有機質の電解液を採用し、エネルギ密度は前章の実験で使用したキャパシタの約 10 倍である[8]。その電気エネルギ蓄積容量は、想定車両の 40km/h走行時の運動エネルギがすべて吸収できるように設定した。これらの電池とキャパシタを前章の実験と同様に、２基の電磁開閉器を介して電動機システムのインバータの直流側と断続し、その接続方法も、常に電池のみを接続する「電池のみ」、常に電池とキャパシタの双方を接続する「並列」、および模擬車両の加減速に応じてキャパシタを優先的に選択する「切換」の３通りを設定した。これにより、キャパシタを併用することによる回生電力量の増加を確認することとした。なお本実験では、電動機システムの電力出入の把握を主な目的とするため、前章と同様に発電機は稼働させず、純電気動力システムとして運転することとした。

運転は、前章および第２章の車両２と同様に、指定車速が表示されるＣＲＴドライバーズエイドを見ながら、電動機システムの操作卓における加速または減速の操作により行った。この台上単体運転におけるダイナモメータの回転速度とトルクは次式により定められる。

$$\omega_{DY} = [V / (D/2)] \times (\varepsilon / \varepsilon_B) \quad \cdots\cdots(4\text{-}1)$$

$$T_{DY} = [R \times (D/2)] / (\varepsilon / \varepsilon_B) \quad \cdots\cdots(4\text{-}2)$$

ここで、ω_{DY}はダイナモメータ回転速度（rad / s)、T_{DY}はダイナモメータ吸収トルク（Nm)である。Vは指定車速（m/s)、Rは空気抵抗・転がり抵抗・慣性加速抵抗を合算した走行抵抗（N)、Dは想定車両の駆動輪外径（m)、εは電動機から駆動輪までの仮想的な総減速比、ε_Bは単体台上運転装置上に設置した減速機の減速比を表す。

減速時に走行抵抗 R が負の値をとる場合は制動状態となるためダイナモメータ側から電動機を駆動し、電動機側では回生制動を最大限に活用して減速させた。この台上単体運転における電動機の回転速度とトルクを検出して機械出力を連続測定するとともに、電力計により電動機システムの直流側の出入電流、電圧を検出して電力を連続測定した。本実験で使用した電力計は、電流検出器は前章と同様にクランプ方式であるが、電力の正負別積算機能を有するため、運転開始および終了の時点で接点信号を電力計に入力することにより、駆動側と回生側の積算電力量を自動的に算出し表示させた。

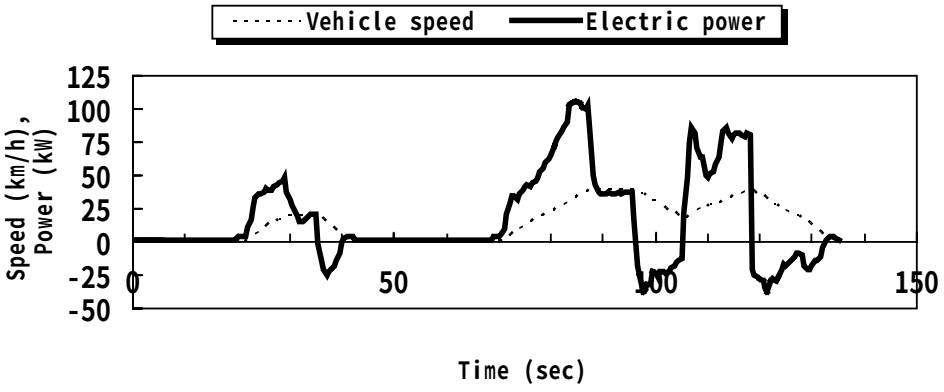


図 4.17　加減速運転におけるモータシステムの要求電力／回生電力の挙動例
（M15 モード、車両換算値）

4.4.2　測定結果と考察

上記の台上運転によって得られた電動機システムの入出電力波形を、M15 モード運転の場合を例として車両１台相当の換算値で図 4.17 に示す。第２章の図 2.15 と同様に、加速時等に電動機システムが要求する電力を正、回生制動時に生じる電力を負の値と定義する。なお前章では回生制動時に発生し蓄電装置に回収される電力と、その有効再利用分の差について考察したが、本章では第２章と同様に、回生制動時に電動機システムの直流側から発生する

電力、電力量をそれぞれ回生電力、回生電力量と定義することとする。

前章と同様に電源を上記の３通りとして各種都市内パターン運転を行った際の要求電力量と回生電力量を走行距離１㎞当たりの値として図 4.18 に示す。要求電力量は図 4.12 で計算した走行仕事量に比べ、電気－機械エネルギ変換時の損失や補機類の電力消費のため、その 1.6～1.7 倍に上っている。一方、回生電力量は同様の理由により、計算上回生可能な仕事量の 60～70%に留まっている。またキャパシタの併用による回生効果の向上をみると、M15 モード運転ではほとんど差が見られないが、路線Ａおよび路線Ｂのパターン運転では、「電池のみ」の場合に比べ、回生電力量は「並列」で 10%前後、「切換」では 20%前後増加しており、前章のコミュータカーを対象とした実験結果と類似の傾向を示している。

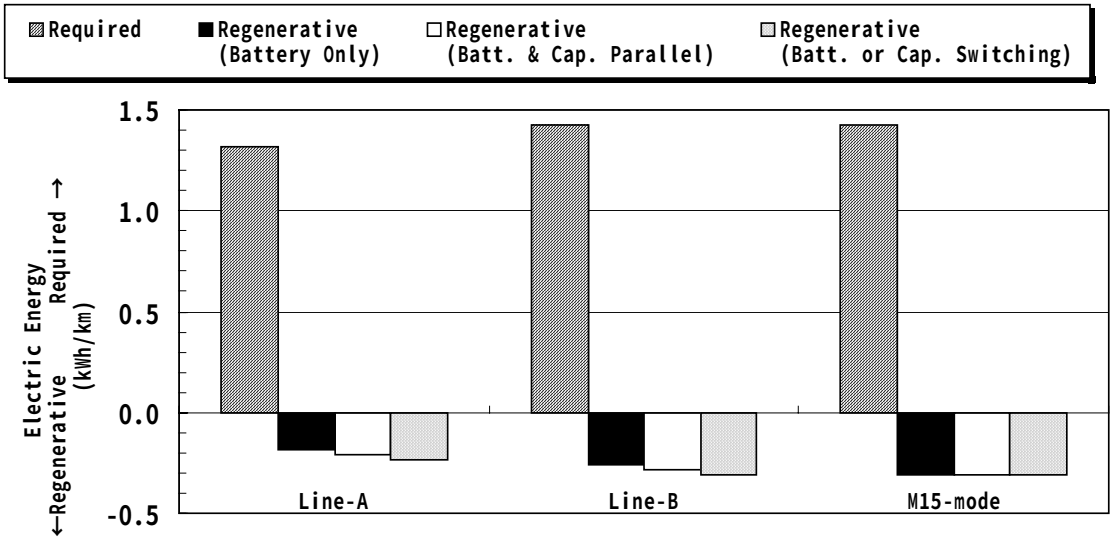


図 4.18　実走行パターン運転における要求電力量と回生電力量（車両換算値）

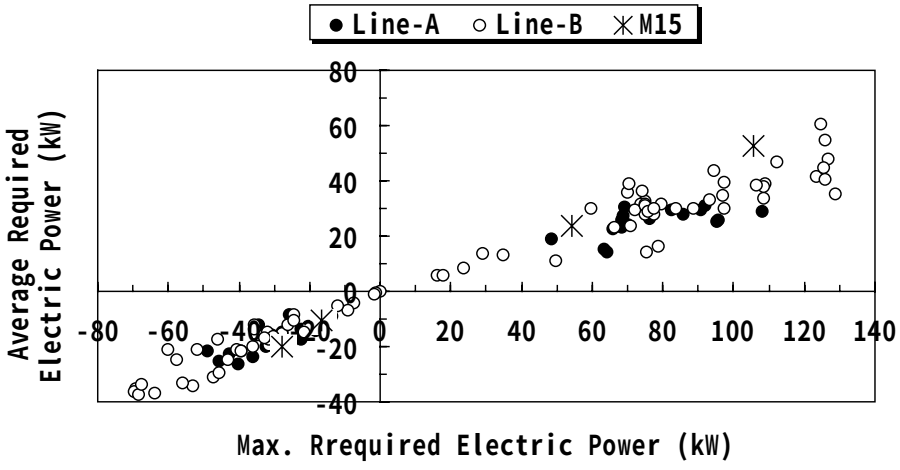


図 4.19　実走行ショートトリップ毎の要求電力、要求電力の最大値と平均値（車両換算値）

各種パターン模擬運転におけるトリップ毎の最大電力と平均電力（それぞれ補機類の消費分を含む）を車両一台分の換算値として図 4.19 に示す。これら各トリップの最大要求電力は 15～130 kW であるが、平均電力はその 1/3 程度に過ぎない。路線Ａ運転での最大要求電力は M15 モードとほぼ同等であるが､路線Ｂ運転での最大要求電力はその 1.2 倍を示した｡一方、回生電力は概ね要求電力の 70%弱であるが、路線Ａ、路線Ｂの運転における最大回生電力はそれぞれM15 モードの場合の約２倍から３倍に達した。これは前述の調査対象とした路線走行においては、最高車速はM15 モードと同等かそれ以下であるが、減速度が高いため回生仕事率が顕著に高まるためと考えられる。

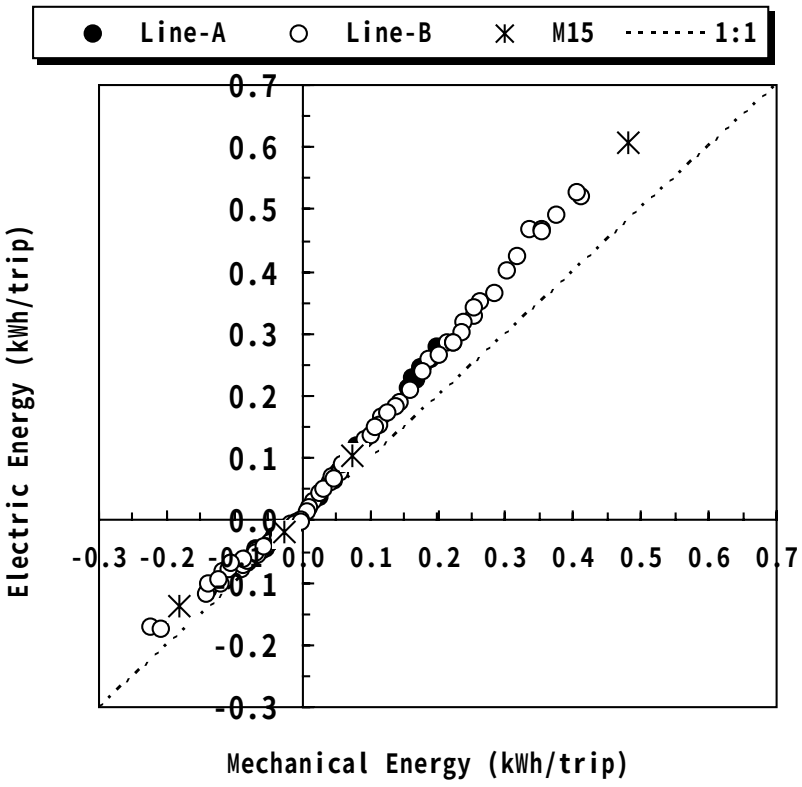


図 4.20　実走行パターン中のショートトリップ毎の機械仕事量と要求／回生電力量（車両換算値）

各種都市内パターン運転における各トリップ毎の機械仕事量と出入電力量を図 4.20 に示す。１トリップ当たりの要求電力量は概ね 0.6 kWh 以下で、これを単位走行距離当たりの値として示すと 1.2～1.3 kWh/km である。一方、１トリップ当たりの回生電力量は 0.2 kWh 以下である｡そして１トリップ当たりの回生電力量は､その要求電力量の 15～35%に相当する。

4.5　模擬ハイブリッドシステムによるエネルギ効率評価方法の検討

4.5.1　実験装置および実験方法

前述のような実機を使用する台上運転においてシリーズハイブリッド動力システムを構成するためには、電動機システム以外にも各種蓄電装置や発電機の実機を準備しなければならない。またそれらは高電圧・大電力で使用されるため、必要となるモジュール数や容量を揃えて任意の実験条件を設定することは非常に困難である。

そこで、一定の電流値または電圧値の設定だけでなく、それらが絶えず変化する過渡的な電力出入設定が可能な充放電試験装置等を利用し、使用電圧を実機よりスケールダウンした静止型の模擬実験を行うこととした。図 4.21 は実験装置の構成、図 4.22 はその外観を示す。駆動電動機システムを充放電試験装置、車載発電機を小容量の直流電源装置に置き換え、電池やキャパシタを接続することにより、静止型の模擬的なシリーズハイブリッドシステムを構成してその最適化を検討することとした。また車両の補機類による電力消費は、別に接続した小型の電子負荷装置によって再現した。

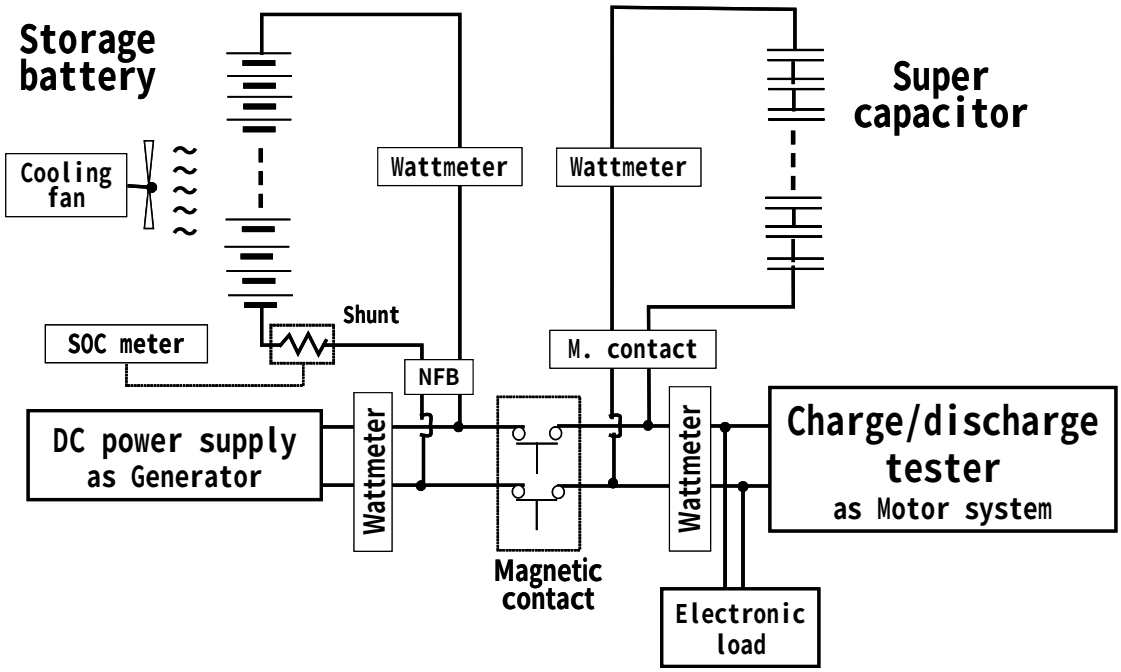


図 4.21　充放電試験装置等を用いた静止型模擬シリーズハイブリッドシステム実験装置の構成

本実験で使用した充放電試験装置は、専用プログラムにしたがって最小 100㎳ 間隔で時々刻々の電流値または電力値を指定することにより、車両の実走行に即した過渡的な充放電を自動的に行うことが可能である。本実験では、充放電試験装置の制御プログラムに上記の台上単体運転で得た電動機システムの電力出入データを使用し、標準電圧を実機の 30%に

設定することにより、模擬シリーズハイブリッドシステム内を流動する電力を実機１基分の30%にスケールダウンして再現した。

図 4.22　充放電試験装置等を用いた静止型模擬シリーズハイブリッドシステム実験装置の外観

表 4.5　模擬ハイブリッドシステムの電池とキャパシタの諸元

Device	Type	Nominal Capacity	Nominal Voltage	Mass (kg)	Volume (Liter)	Energy Density		Number of Module	
		(1 module)				(Wh/kg)	(Wh/L)	for 1 unit	Static Exp.
Battery-A	Lead-acid	25Ah	12	10.1	3.7	29.7	81.0	20	6
Battery-B	Nikkel-metal Hydride	28Ah	12	6.1	3.2	55.1	105.0	20	6
Battery-C	Lead-acid	15Ah	12	6.4	2.4	28.1	76.5	20	6
Super Capacitor	Organic Solution	62F	54	6.7	5.6	3.7	4.5	6.67	2

蓄電装置は表 4.5 に示す電池、キャパシタの中から単独使用、または組合せ使用として選定し、電動機システム１基分に必要なモジュール数の 30%を模擬システムに接続した。電池Ａおよびキャパシタのモジュールは、表 4.4 に示したものと同一である。電池Ｂは電池Ａと同程度の容量を有するニッケル水素電池、電池Ｃは電池Ａの６割程度の容量を有する小型の密閉式鉛酸電池である。なお前章の検討において、制動時に回収される電力量は「切換」の場合に最大となるものの、蓄積エネルギの再利用やシステム電圧の変動等に難点が見られた結果を踏まえ、本実験においてはキャパシタを電池と併用する場合は「並列」の接続を採用することとした。

発電機出力は、実車レベルではM15 モード運転時の停車中を含めた全時間の平均要求電力とほぼ等しい 21kW と想定し、模擬システムでは直流電源出力をその１基分（1/4）の 30%に相当する 1.58kW に設定した。電池の充電状態（ＳＯＣ）が 50～70%の範囲に保たれるよう、その変化に応じて一定出力稼働、または完全停止の、いわゆるオン－オフ制御を行った。

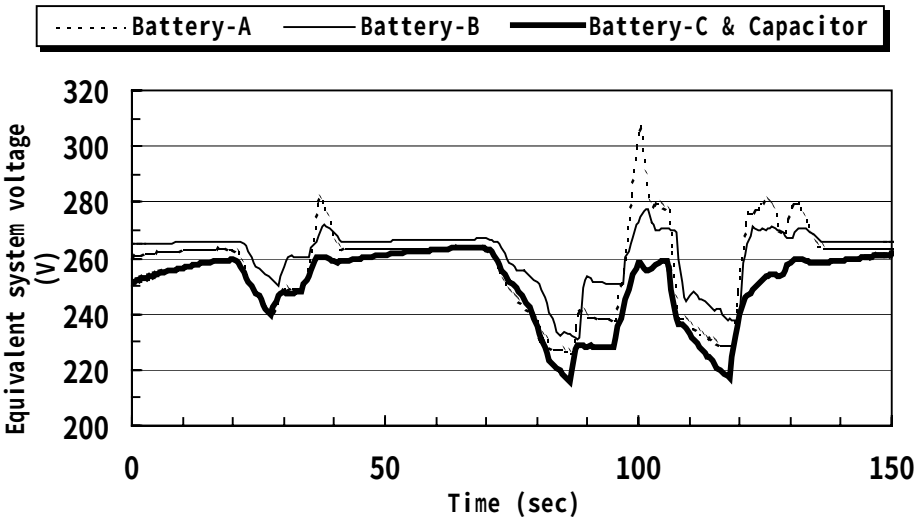


図 4.23　M15 モード運転時の模擬ハイブリッドシステムの電圧変動（発電機稼働時）

4.5.2　蓄電装置の選定

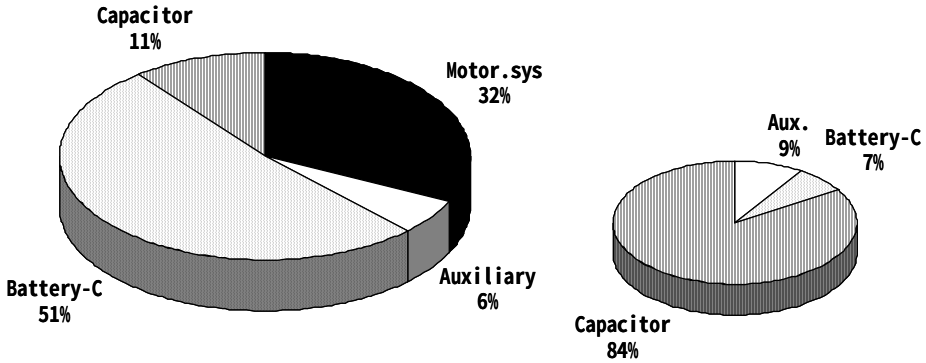
蓄電装置を３通りに設定して発電機稼働状態でM15 モードの模擬運転を行った場合の、電動機システムのインバータ直流側の電圧変動を実機換算値として図 4.23 に示す。前述の実機台上運転においてはキャパシタを電池Ａと併用したが、車両への搭載を想定すると蓄電装置の重量、容積が過大となるため、本実験においてはキャパシタを電池Ｃと併用することとした。蓄電装置が「電池Ａのみ」の場合は、電圧が 100 秒目付近の回生制動時にシステムの上限値（290Ｖ）を大幅に超えるため、実機では回生電力の抑制が必要となり、回生電力量は削

減される。一方、「電池Ｂのみ」または「電池Ｃとキャパシタの組合せ」の場合の最高電圧は280Ｖ以下に留まるため、回生電力は抑制されることなく、制動エネルギは有効に回収できると考えられる。そこで以降の実験では、蓄電装置として「電池Ｂのみ」または「電池Ｃとキャパシタの組合せ」を検討対象とした。

4.5.3　蓄電装置における充放電損失

(1) 車上における発電電力量の行方　　第２章でも触れたように、シリーズハイブリッド動力システムの車上の電気エネルギの流動は複雑であるため、その経路ごとの出入状況を定量的に把握する必要がある。

上記の実験装置を用いて「電池Ｃ・キャパシタ併用」で路線Ｂの模擬運転を行った場合の発電電力量と回生電力量の流入先を図 4.24 に一例として示す。この例では、発電電力量の４割弱が電動機システムと補機類に直接供給され、残りの６割強は電池とキャパシタに一旦蓄積された後に使用されるという形態をとる。また制動時の回生電力量はその一割弱が補機で直接消費され、残りのほとんどがキャパシタに蓄積される。シリーズハイブリッドシステムの車載発電機用燃料から車両駆動に至るエネルギ効率を評価するためには、これらの蓄電装置で生じる充放電損失を把握することが不可欠であると考えられる。第２章においては、電池やキャパシタの充放電効率を一律に 80%と仮定し、発電電力量が有効利用される比率を「発電機エネルギ有効係数」として概算したが、本章ではこれら蓄電装置の単体特性を詳しく調べ、充放電で失われる電気エネルギをより高い精度で算定する方法を検討した。



(a)Generated Energy　　(b) Regenerative Energy

(Generated Energy : Regenerative Energy = 1 : 0.223)

図 4.24　発電電力量と回生電力量の行方（路線Ｂパターン運転、発電機断続）

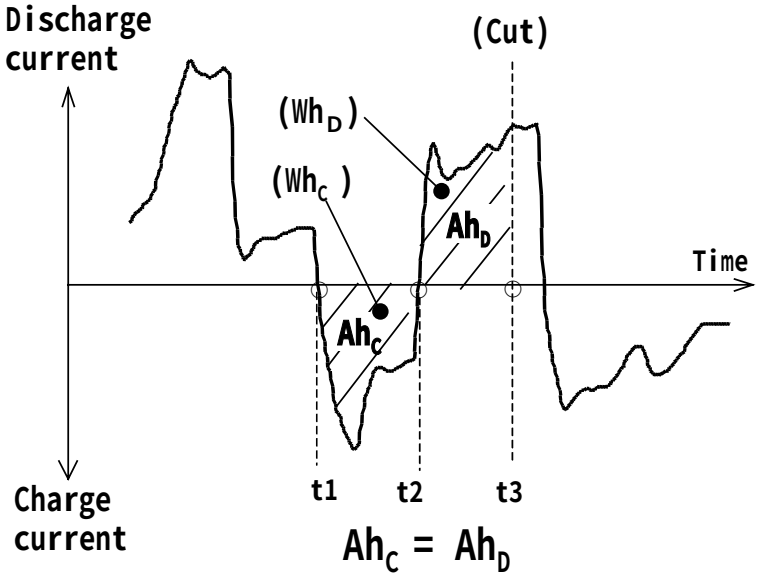


図 4.25　加減速運転における局所的な充放電効率の実測方法

(2) 蓄電装置における充放電損失の測定　本実験においては、実走行条件下の小刻みな充放電に伴う電池等の局所的な電気エネルギ損失（エネルギベースでみた充放電損失）を以下の方法により実測した。まず充放電に伴う電荷の喪失は皆無である、すなわちクーロン効率は 100%であると仮定した。そして図 4.25 に示すように、電池等が充電から放電へ切り替わる時点の前後に充電電流量（Ah）と放電電流量（Ah）を等しく採り、その電流量に該当する充電電力量（Wh）と放電電力量（Wh）をそれぞれ積算したうえで、それら両者の差が充放電損失電力量、後者の前者に対する比率が充放電効率であるとみなした[9]。

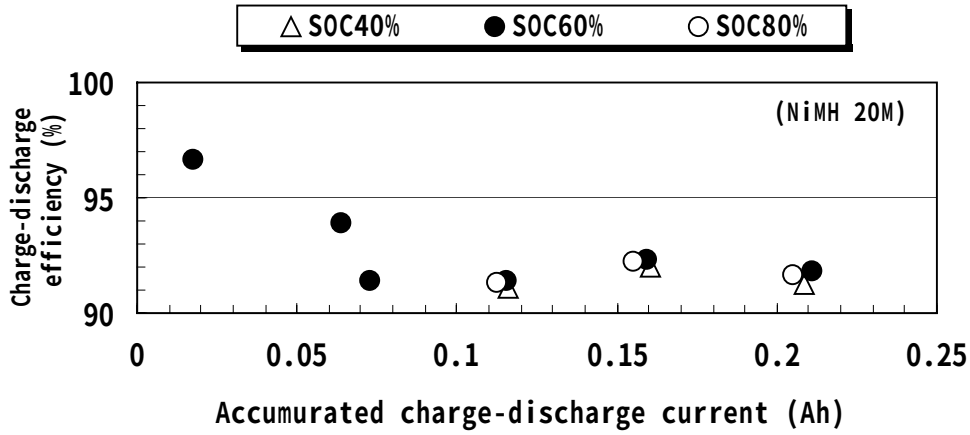


図 4.26　M15 モード運転における電池Ｂの局所的な充放電効率

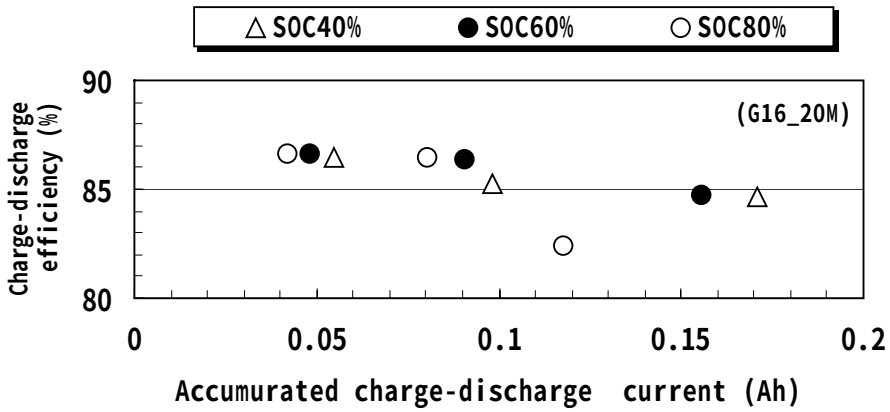


図 4.27　M15 モード運転における電池Ｃの局所的な充放電効率

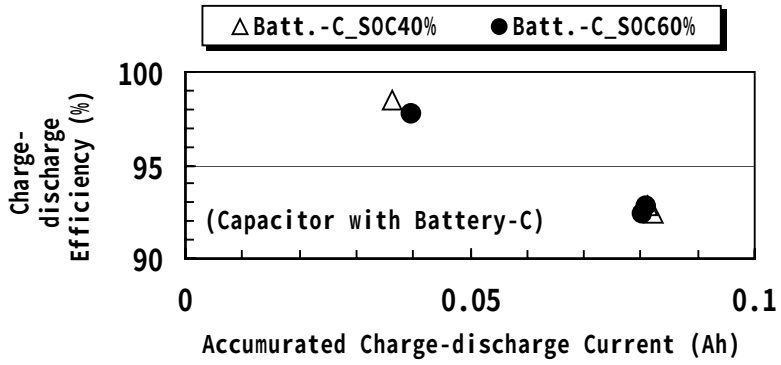


図 4.28　M15 モード運転におけるキャパシタの局所的な充放電効率

図 4.26～図 4.28 に、M15 モードの模擬運転における電池の局所的な充放電効率の測定結果を示す。電池Ｂの充放電効率は、0.1～0.2Ah 程度の電流量出入においては 92%前後、それ以下の微少な電流量出入では 95%前後の値を示す。これに対し、電池Ｃの充放電効率は 85%前後とやや低い値を示す。なおキャパシタにおいては、局所的な充放電効率は図 4.24 に示すように 93～98%であり、電池Ｂとほぼ同等の値を示した。

(3) 内部抵抗と充放電損失の計算　　図 4.29 に、電池を一定定電流で放電させた場合の電圧降下を模式的に示す。このような電圧降下は電池の分極によって生じ、分極には抵抗分極、活性化分極、濃度分極の三種類が存在するとされる[10]。放電開始直後の急激な降下は電気的な抵抗分極に起因し、それに伴う電力損失はオームの法則に従うとされる[10]。一方、それに続く曲線状の降下は主に活性化分極に起因するとされるが[10]、その際の電圧降下量と損失エネルギの関係についてはあまり明確にされていない。

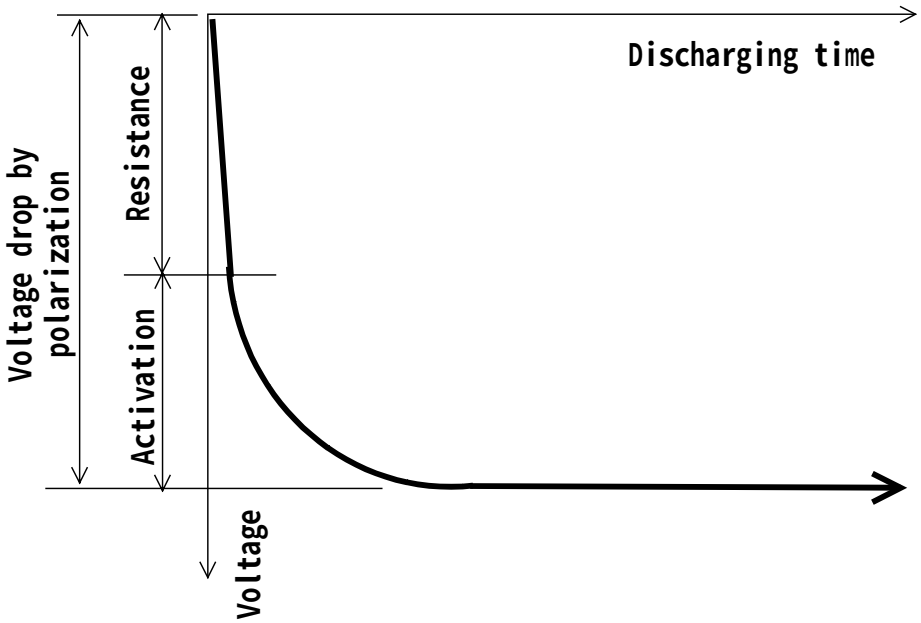


図 4.29　ステップ状放電時の電池等の電圧降下（模式図）

電池Ｃおよびキャパシタを図 4.29 のようにステップ状に放電させた場合の電圧降下における、抵抗分極分と活性化分極分を図 4.30、図 4.31 にそれぞれ示す。図から明らかなように、電圧降下全体に対する、抵抗分極による降下は、電池Ｃにおける 60Ａの放電では約 70%、キャパシタにおける 100Ａの放電では約 80%とその大半を占める。電池Ｂの電圧降下、また充電側の電圧上昇についても同様の傾向がみられた。したがって本実験では、近似的に、放電時の電圧降下は全て電気抵抗によって生じるとみなして差し支えないものと仮定した。

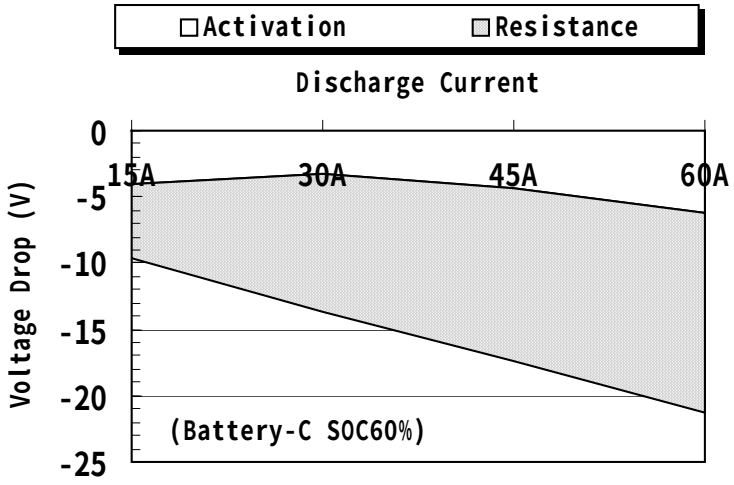


図 4.30　電池Ｃの電圧降下における抵抗分極と活性化分極の比率（ＳＯＣ：60%）

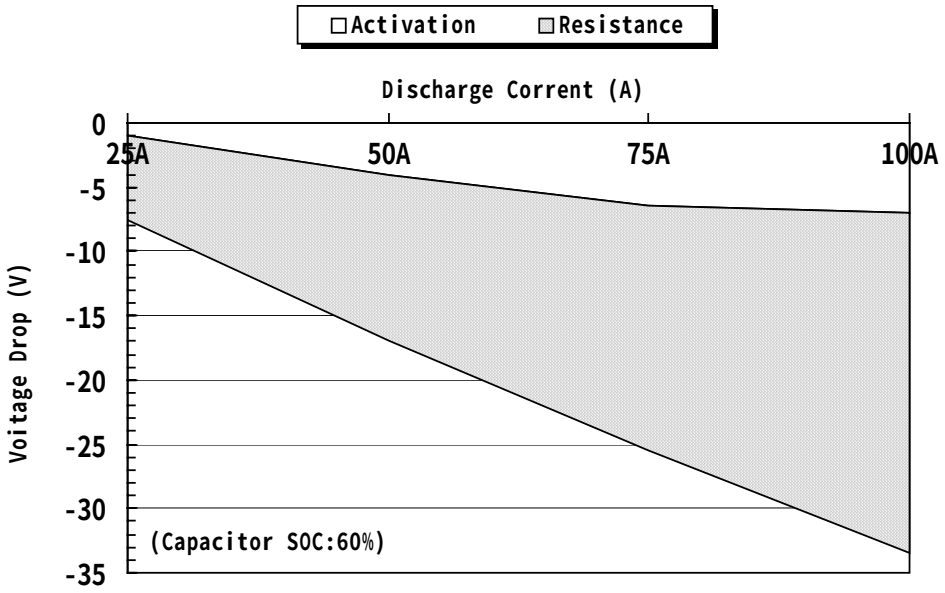


図 4.31　キャパシタの電圧降下における抵抗分極と活性化分極の比率（初期ＳＯＣ：60%）

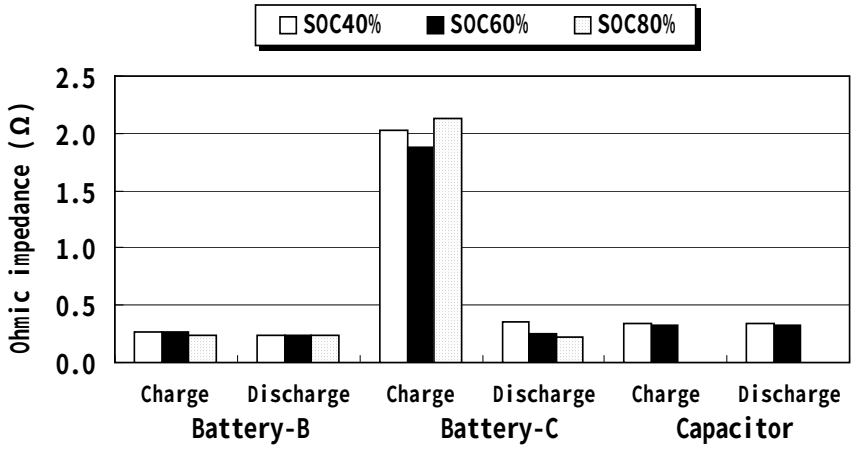


図 4.32　電圧降下／上昇から推定した電池とキャパシタの電気抵抗値
（電動機システム１基換算）

図 4.32 に、このような方法で得た各種蓄電装置の電気抵抗値（想定システム１ユニット分の換算値）を、各々の充電状態（ＳＯＣ）毎に示す。電池Ｂは内部抵抗が最も小さく、ＳＯＣや充電側／放電側の違いによる差は僅かである。電池Ｃの放電側の抵抗は電池Ｂより 10～30%大きく、またＳＯＣが小さいほど増大する傾向を示す。一方、充電側の抵抗は放電側の数倍にのぼる。キャパシタの抵抗はＳＯＣや充電・放電の違いによる差はほとんどなく、電池Ｂより若干大きい値を示す。以上の結果から、パターン運転中の各蓄電装置における充放電損失エネルギは、次式に示すように、充電／放電の小区分毎に、電流自乗値に電気抵抗値を乗じて得た損失電力を積分し、それらを合算することにより算定できると考えられる(10)

。

$$ELB_C = \sum_{i=1}^{p} \int_{t1i}^{t2i} IB_C^2 \times RB_C \ dt \qquad \cdots\cdots(4\text{-}3)$$

$$ELB_D = \sum_{j=1}^{q} \int_{t1j}^{t2j} IB_D^2 \times RB_D \ dt \qquad \cdots\cdots(4\text{-}4)$$

$$ELC_C = \sum_{k=1}^{r} \int_{t1k}^{t2k} IC_C^2 \times RC_C \ dt \qquad \cdots\cdots(4\text{-}5)$$

$$ELC_D = \sum_{l=1}^{s} \int_{t1l}^{t2l} IC_D^2 \times RC_D \ dt \qquad \cdots\cdots(4\text{-}6)$$

ここで、ELB は電池内の損失、ELC はキャパシタ内の損失（Wh/test）であり、添字の C は充電側、D は放電側を表す。 IB は電池電流、IC はキャパシタ電流、RB は電池の電気抵抗、RC はキャパシタの電気抵抗である。また、t1、t2 はそれぞれ小区分毎の充電または放電の開始時刻と終了時刻を示す。この方法によって求めた電池、キャパシタの局所的な充放電損失エネルギの計算値を、前述の方法で得た実測値と比較した結果を図 4.33～図 4.35 に示す。電池Ｂ、電池ＣともＳＯＣ が 60%の場合には、充放電損失エネルギの計算値は実測値とほぼ一致する。またＳＯＣが 60%の電池Ｃと併用したキャパシタについても同様の一致性がみられるため、電池のＳＯＣが 60%前後であれば、蓄電装置の充放電で生じる損失電力量は、前述のように内部抵抗と電流値からの計算により推定可能であると考えられる。

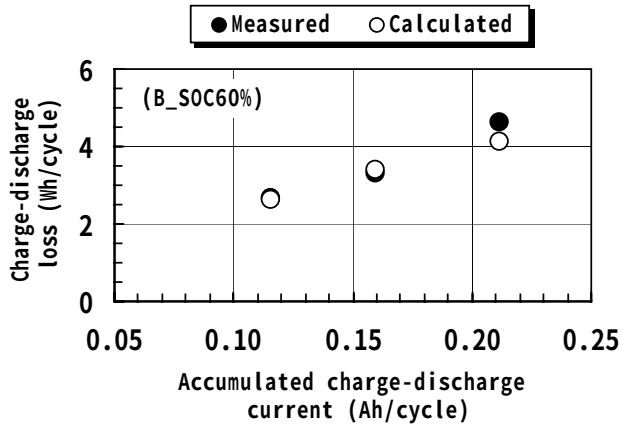


図 4.33　電池Ｂにおける局所的な充放電損失電力量の測定値と計算値（ＳＯＣ：60%）

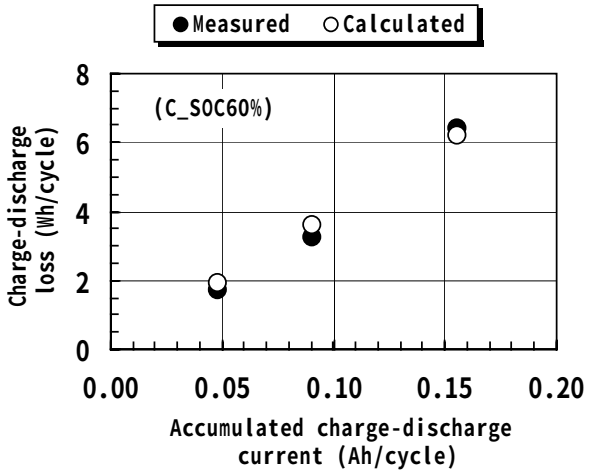


図 4.34　電池Ｃにおける局所的な充放電損失電力量の測定値と計算値
（ＳＯＣ：60%、キャパシタと併用）

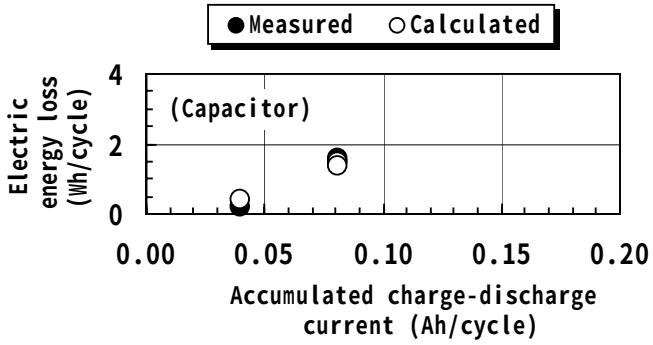


図 4.35　キャパシタにおける局所的な充放電損失電力量の測定値と計算値
（ＳＯＣ60%の電池Ｃと併用）

(4) 実走行時の充放電損失と発電電力量　　蓄電装置を「電池Ｃ・キャパシタ併用」とした

場合の、M15 モードと路線Ｂの模擬運転において生じる充放電損失エネルギ（電力量）の内訳を図 4.36 に示す。図示した損失エネルギは走行１㎞ 当たりの車両換算値である。ここでは運転開始時点での電池ＣのＳＯＣはいずれも 60%とした。発電機稼働条件としては、M15 モードの場合は１サイクルの時間が短いので、常時稼働のサイクル、常時停止のサイクル、および電池のエネルギ収支が均衡するような比率でそれらのサイクルを組み合わせた合成サイクルの３通りとした。また路線Ｂの場合は１サイクルの運転時間が 30 分以上におよぶため、運転開始時点で発電機を稼働状態または停止状態とし、走行に伴う電池エネルギの増減に対して、ＳＯＣを 50%以上 70%以下の範囲に保つよう発電機を起動・停止することとした。

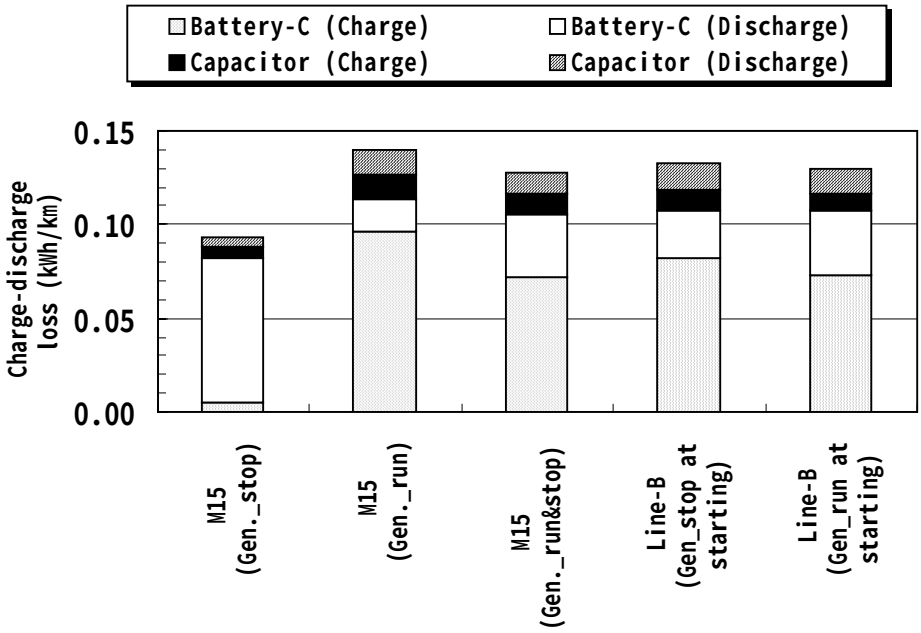


図 4.36　加減速パターン運転における充放電損失電力量の内訳

M15 モード運転において、発電機停止の場合は充放電損失エネルギの殆どが電池放電損失分であるが、発電機稼働の場合は逆に電池充電損失分が大半を占める。後者の場合は電池充電損失が大幅に増大するため、損失の総量は発電機停止時の 1.5 倍近くに達する。キャパシタでの損失は充放電損失エネルギ全体の 20%弱に過ぎない。また発電機の起動・停止を伴う M15 モードおよび路線Ｂの模擬運転においては、損失全体の 50～60%が電池充電損失、20～30%が電池放電損失であり、残りの 20%前後がキャパシタにおける損失である。これら起動・停止を伴う模擬運転の中では、路線Ｂにおいて発電機稼働状態で運転開始した場合に若干電池充電損失が多く電池放電損失が少ないが、充放電損失エネルギの総量は三者ともほぼ同じ値を示す。

蓄電装置を「電池Ｂ」または「電池Ｃ・キャパシタ併用」とした場合の、M15 モードおよび路線Ｂの模擬運転における車上の発電電力量と充放電損失エネルギ（電力量）を対比して図 4.37 に示す。発電機稼働条件は、図 4.31 の起動・停止を伴う場合と同一である。本実験の想定車両においては外部充電を行わないため、電池等の蓄積エネルギや回生エネルギを含めた車上の電気エネルギの供給源は全て車載発電機である。そこで純電気動力方式の充放電効率の評価にならい、発電機の供給電力量が車上で有効利用される比率を「ハイブリッド充放電効率」として次式で定義した。

$$\eta_{HCD} = 1 - (E_L / E_{GEN}) \qquad \cdots\cdot(4\text{-}7)$$

ここで、η_{HCD} はハイブリッド充放電効率、E_Lは充放電損失電力量(kWh/km)、E_{GEN}は発電電力量(kWh/km)である。

本実験の模擬システムのハイブリッド充放電効率は、蓄電装置が電池Ｂの場合は 95%前後、「電池Ｃ・キャパシタ併用」の場合は 90%弱という値を得た。後者の場合は損失電力量が前者の二倍程度となるが、発電電力量に対しては十分に小さい値であるといえる。これは発電電力の直接使用と、満充電状態付近の使用回避により、充放電に伴う損失が低減されるため、60～70%といわれる鉛酸電池式電気自動車の充放電効率[11)(12)]を大幅に上回り、高性能のリチウムイオン電池に近い値[8)]を示すものと考えられる。

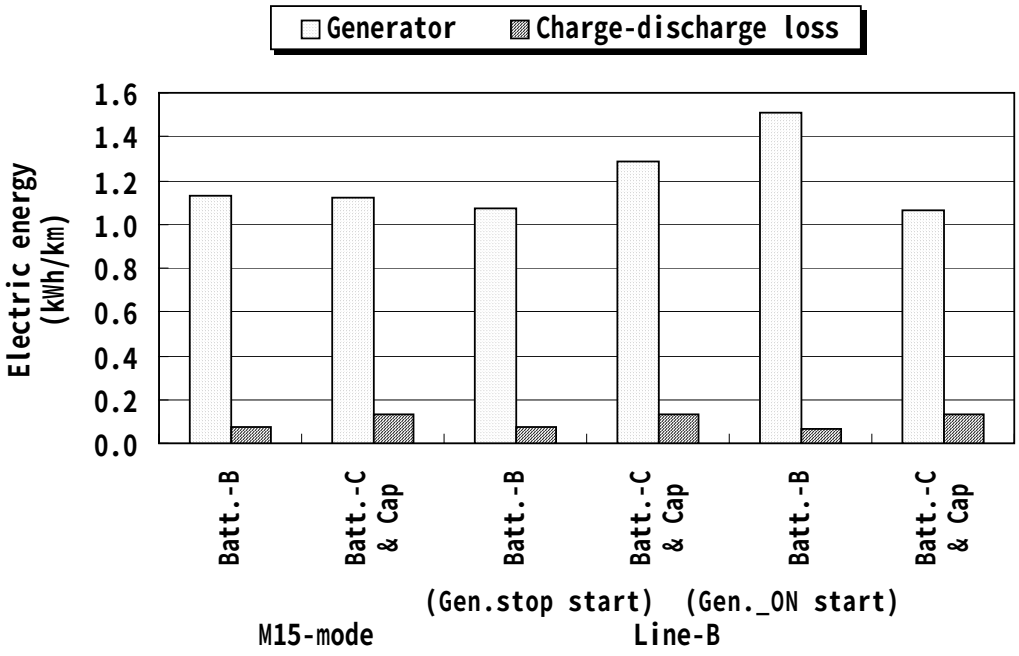


図 4.37　加減速パターン運転における発電電力量と充放電損失電力量

4.5.4　模擬システムのエネルギ効率評価

以上の検討結果に基づき、本実験の模擬シリーズハイブリッドシステムと従来型バスのディーゼル機関について、車載燃料の化学的なエネルギから車両駆動の機械的なエネルギに至る、総合的なエネルギ変換効率を試算した結果を表 4.6 に示す。前者については、発電専用小型ディーゼル機関の熱効率と発電体の機械－電気エネルギ変換効率を最近の技術動向から仮定したうえで、本実験の結果から得た電動機システムの電気－機械エネルギ変換効率と蓄電装置の充放電効率を乗算した。発電専用機関は、熱効率が最大となる一点の運転条件（回転速度およびトルク）での稼働、または完全停止であるため、パターン運転を通じた平均熱効率は機関の最大熱効率に等しいものとした。また制動時におけるエネルギ回生の効果を反映するために、次式で示すように、パターン運転にわたる要求電力量を「要求電力量と回生電力量の差分」で除した値を「回生係数」と定義した。

$$REG_C = E_{REQ} / (E_{REQ} - E_{REG}) \quad \cdots\cdots (4\text{-}8)$$

ここで、REG_Cは回生係数、E_{REQ}はパターン運転全体の要求電力量(kWh/test)、E_{REG}はパターン運転全体の回生電力量(kWh/test)である。

この回生係数を上記の各要素の効率の乗算値に乗じることにより、本実験で設定した模擬シリーズハイブリッドシステムの総合効率を算出した。

従来型バスのディーゼル機関については、大型路線バスの走行仕事量に補機駆動仕事量を加えた所要仕事量（計算値）を、従来型の大型路線バスの都市域における実測燃費（2.1～2.6km/ﾘｯﾀｰ[13)(14)]）と対比することにより、搭載機関の熱効率を概算した。

表 4.6　模擬ハイブリッドシステムのエネルギ効率の評価

Component	Bus line-B		Suburban Bus lines
	Series hybrid		
	Battery-B	Battery-C & Capacitor	Conventional
Engine	*0.45*		*0.21～0.26*
Generation	*0.95*		-
Charge-Discharge	0.942	0.888	-
Motor system	0.698		-
Regeneration coefficient	1.303		-
Total	**0.366**	**0.345**	*0.21～0.26*

上記の計算結果にしたがって、実走行条件における本実験の模擬シリーズハイブリッド動力システムのエネルギ効率を従来型バスのディーゼル機関と比較すると、前者は後者に対し、蓄電装置が電池Ｂの場合は 1.4〜1.8 倍、「電池Ｃ・キャパシタ併用」の場合は 1.3〜1.7 倍であると評価される。

さらに、永久磁石式同期電動機の採用やキャパシタ容量の最適化を行えば更に１～２割程度の効率の改善が実現できると考えられるため[6]、バス用シリーズハイブリッド動力システムのエネルギ効率は最大で従来型のディーゼル機関駆動方式の２倍程度に達する可能性を有すると推定される。ただし第２章でも述べたように、ハイブリッド化により車両質量が従来方式と比較して５％程度増加し、走行仕事量が増加するため、高効率化による燃費改善効果は若干相殺される点に留意する必要がある。

また、本実験で提案したように、路線バス用シリーズハイブリッドシステムの蓄電装置を「安価な小容量鉛酸電池と耐久性に優れるキャパシタの併用」とすれば、高価なニッケル水素電池を採用する場合と同等以上の電圧抑制効果が得られ、充放電効率もそれに準じる 90%程度の値に達する可能性が明らかになった。鉛酸電池のリサイクル率は 90%以上という高い水準にあり、キャパシタは車両の新造から廃車に至るまで交換無しで使用可能であると推定されるが[7]、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池等の新型電池をハイブリッド電気自動車に使用した場合の耐久性や寿命については未だ明らかでない点が多い。

したがって蓄電装置を上記のように「小容量鉛酸電池とキャパシタの併用」とすれば、車両の使用過程で交換を必要とする蓄電装置は小容量の鉛酸電池だけで済むため、蓄電装置に係わる費用軽減やリサイクル性の点でも有利であると考えられる。

4.6 結　言

本章では、営業路線上でのバス車両による実車走行を行って特有の走行実態を把握し、それに基づいてバス車両に適すると考えられるシリーズハイブリッド動力システムを設定した。これを模擬した単体台上運転装置および充放電試験装置による実験を行い、電池等の蓄電装置の仕様や、充放電損失の算定方法について考察したうえで、動力システムとしてのエネルギ効率の評価を試みた。それらによって、以下の結果が得られた。

(1) 路線バス車両により都市域の路線上で実車走行を行い、車速データからバス特有の走行実態を解析して、発進加速等の性能要件を把握した。それにより、特に変速操作による中断が発進加速の大きな制約となること、発進停止頻度は大型車の代表的走行パターンといわれ

るM15 モードの約 1.5 倍であること等を明らかにし、路線バス車両には電動機駆動方式が最適であることを示した。

(2) 航続性能の観点から、路線バス向けに電動機四基を含むシリーズハイブリッドシステムを設定し、実走行パターンに基づく台上単体運転により各部の電力出入等を計測した。それにより、M15 モードと比べて最大回生電力は約３倍に上り、また回生電力量は要求電力量の15～35%であることを確認した。

(3) 充放電試験装置と電池・キャパシタ等を組み合わせて静止型の模擬シリーズハイブリッド実験装置を構成し、各要素の電力出入を計測してハイブリッドシステム内の電力流動を解析した。その結果、車載発電機が電動機システム等に給電する過程で蓄電装置内に生じる充放電損失電力量は、電気抵抗値と電流値から積算可能であり、それは発電電力量に対して 10%程度であることを示した。また適切な蓄電装置として、「小容量鉛酸電池とキャパシタの組み合わせ」を提案した。

(4) 路線バスの実走行条件における模擬シリーズハイブリッドシステムの、燃料から車両駆動に至るエネルギ効率を試算した結果、従来型バスのディーゼル機関駆動方式に比べ、最大で２倍近い値に達する可能性を有するものと評価した。

第４章の参考文献

(1) 国土交通省ホームページ、自動車交通局、(2003)

(2) （株）小野測器、「走行性能測定用空間周波数方式非接触車速計 LC-676S 取扱説明書」、P.1-3 (1986)

(3) 林田 他、自動車技術会 2002 年秋季学術講演会前刷集 No.82-02、P.5-8 (2002)

(4) 吉田 他、交通安全公害研究所報告第２号、P.39-47 (1974)

(5) 大野 他、「加速刺激に対する立位姿勢の安定性に関する研究」、人間工学第 29 巻特別号

(6) 加部 他、「都市交通車両用モータドライブシステムの開発」、自動車技術会 2003 年春季学術講演会講演前刷集 No.30-03、P.11-16 (2003)

(7) H. Smizu et al, " KAZ the Super Electric Vehicle", EVS-18 Proceedings (2001)

(8) 佐々木 他、「キャパシタハイブリッドバスシステムの開発（第２報」、自動車技術会 2001 年秋季学術講演会講演前刷集 No.102-01、P.9-14 (2001)

(9) 堀江 他、「HEV 用高出力型リチウムイオン電池システムの研究開発」、自動車技術会 1997 年春季学術講演会講演前刷集、P.53-56 (1997)

(10) 日本電池（株)、「最新実用二次電池（第２版)」、P.215-217、日刊工業新聞社(1999)
(11) M. Hayashida et al, "Electricity Flow Analysis in the Series Hybrid System by the Charge-discharge Tester" SAE Paper 2001-01-0784 (2001)
(12) 清水、「電気自動車の全て（第２版)」、P.21-23　(1995)、
(13) 小椋　他、「電気自動車の開発」、自動車技術、Vol. 49-No.9、P.28-33　(1995)
(14) バスラマインターナショナル 75、Vol.14-No.1P.84-85、ポルト出版　(2003)